

양생 조건이 콘크리트의 체적 변화에 미치는 영향

이광명¹⁾ · 선우주연¹⁾ · 이회근^{2)*} · Kamal H. Khayat³⁾

¹⁾성균관대학교 토목환경공학과, ²⁾삼성물산(주) 건설부문 기술연구소, ³⁾Sherbrooke대학교 토목공학과

Influence of Curing Conditions on Volumetric Changes in Concrete

Kwang-Myong Lee¹⁾, Joo-Yeun SunWoo¹⁾, Hoi-Keun Lee²⁾, and Kamal H. Khayat³⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

²⁾Research Institute of Technology, Samsung Construction & Engineering, Sungnam 463-771, Korea

³⁾Dept. of Civil Engineering, Université de Sherbrooke, Quebec, J1K 2R1, Canada

ABSTRACT This paper presents the experimental results on volumetric changes in ordinary portland cement concrete made with various water-to-cement ratios (W/C's) ranging from 0.32 to 0.50 and cured in four different conditions. Curing regimes employed in this work were designed to exhibit autogenous and drying shrinkage as well as swelling of concrete. The concrete avoided any moist evaporation (Regime I) showed only autogenous shrinkage and the lower the W/C, the greater the autogenous shrinkage. The concrete exposed to air drying conditions at $20\pm 1^\circ\text{C}$ and $60\pm 3\%$ RH after 6-day water curing at $20\pm 1^\circ\text{C}$ (Regime II) swelled and then started to shrink. The maximum swelling value of concrete developed in water curing was between 15 and 40 ± 10^{-6} , and the greatest total shrinkage (autogenous+drying shrinkage) was obtained for the mixture made with W/C of 0.32. The concrete let to air drying conditions (Regime III) showed greater total shrinkage compared to the concrete cured in Regime II. The concrete exposed to air drying condition after 6-day sealed curing (Regime IV) exhibited slightly smaller total shrinkage than that of the concrete cured in Regime III. Net drying shrinkage that can be derived from the results of Regime I, III, and IV increased as the W/C increased despite of similar total shrinkage. This result indicated that drying shrinkage governs total shrinkage of high-W/C concretes. In other words, a portion of autogenous shrinkage in total shrinkage increased in low-W/C concretes. Therefore, it should be controlled in terms of cracking potential. Finally, total shrinkage of high-strength and high-performance concrete made with low W/C can be effectively reduced by appropriate early moisture curing.

Keywords autogenous shrinkage, drying shrinkage, swelling, W/C, curing

1. 서 론

콘크리트 구조물은 사용 하중에 의한 변형 이외에도 콘크리트 내외의 상대 습도, 온도 등의 차이로 인해 체적이 변화한다. 이러한 체적 변화는 매우 복잡하며 각기 서로 다른 형태의 수축현상이 조합되어 나타난다. 이미 잘 알려진 바와 같이, 건조한 환경에 노출된 콘크리트는 수축하게 되는 데, 굳지 않은 상태에서는 이를 소성수축이라 하고 굳은 콘크리트에서는 건조수축이라 한다. 이러한 수축의 원인은 콘크리트 표면에서의 수분 증발로, 일반적으로 콘크리트의 수축이라 하면 주로 건조수축을 나타내었으나 물-시멘트 비(W/C)가 낮고 결합재량이 많은 고강도 또는 고성능 콘크리트의 사용이 증가하면서 시멘트 수화 반응에 의한 절대 체적의 감소인 자기수축

에 대한 관심이 높아지고 있다. 게다가, 자기수축의 대부분은 콘크리트의 인장 강도가 낮은 재령 초기에 발생하여 균열 발생 가능성이 커질 수 있기 때문에 콘크리트 구조물의 내구 수명을 확보하기 위해서는 반드시 제어되어야 한다.

일반적으로 콘크리트의 전체 수축은 온도수축, 자기수축, 건조수축을 모두 합하여 나타낼 수 있다. 전체 수축을 계산함에 있어서 온도 수축량은 콘크리트의 온도가 감소하면 (+)가 되고 온도가 증가하면 (-)가 된다. 만약 콘크리트가 수증양생 상태에 있으면 자기수축은 거의 발생하지 않으며, 콘크리트 내부의 수분이 증발되지 않는다면 건조수축은 발생하지 않는다. 하지만 콘크리트가 항상 수중에 있는 경우를 제외하고 자기수축과 건조수축이 동시에 0이 될 수는 없다¹⁾. 이와 같이, 양생 방법에 따라 콘크리트의 전체 수축량이 차이를 나타낼 수 있으며, 각각의 수축 요소들의 영향 정도가 달라 질 수 있다.

본 연구에서는 다양한 양생 조건 하에서의 콘크리트 체적 변화에 대한 이해를 돕고 적절한 양생 방법에 의

*Corresponding author E-mail : hoikeun.lee@samsung.com

Received August 4, 2005, Accepted March 30, 2006

©2006 by Korea Concrete Institute

한 콘크리트의 전체 수축 감소 방안을 모색하고자, 서로 다른 4가지의 양생 조건을 정하여 각각의 양생 조건이 콘크리트의 체적 변화에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

2. 실험 연구

2.1 재료 및 배합비

콘크리트를 제조하기 위해 비중이 3.15이고 블레인 치수가 3,150cm²/g인 1종 시멘트를 사용하였다. 잔골재로는 비중은 2.58이고 흡수율이 1.03%인 강모래를, 굵은골재로는 최대 치수가 25mm이고 비중과 흡수율이 각각 2.62,

0.70%인 쇄석을 사용하였으며, 잔골재와 굵은골재의 조립률은 각각 2.86, 6.90이었다.

Table 1은 본 연구에서 사용한 일반 콘크리트(OPC) 배합비로, 단위 수량은 168kg으로 동일하고 단위 시멘트량을 다르게 하여 세 종류의 물-시멘트 비(W/C)를 정하였다. 이러한 경우, 콘크리트의 수축에 직접 관여하는 시멘트 페이스트량이 배합별로 다소 차이가 발생하여, 다시 말해 골재량에 따라 콘크리트의 수축 및 골재에 의한 내부 구속도 차이로 인장 응력이 다르게 나타날 수 있다.

목표 슬럼프인 190±10mm와 4.5±1.5%의 공기량을 얻기 위해 나프탈렌 계열의 고성능 감수제(HRWRA)와 공기 연행제(AEA)의 사용량을 조절하였다.

2.2 양생 조건

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 5가지 양생 조건을 도식적으로 나타낸 것으로, 양생 조건 I-IV는 체적 변화 측정을 위한 것이며, 양생 조건 V는 압축 강도 실험을 위한 표준 양생을 나타낸다. Table 2는 각 양생 조건별 세부 사항과 양생 조건 I-IV로부터 측정할 수 있는 콘크리트 체적 변화의 종류를 나타낸다.

양생 조건 I은 시편을 밀봉하여 수분 증발 및 외부로부터의 수분 흡수를 차단한 경우로, 자기수축만을 측정할 수 있다. 양생 조건 II에서는 몰드 제거 후에 시편을 밀봉하지 않고 20±1°C의 수조에서 6일간 수중 양생한 후 재령 7일 이후부터는 온도가 20±1°C이고 상대 습도가 60±3%인 조건에 노출시켜 기건 양생을 실시하였다. 지금까지 일반 콘크리트의 건조수축을 측정하기 위해 양생 조건 II와 같은 방법이 주로 이용되어 왔으며, 이러한 조건에서 측정된 콘크리트의 수축에는 건조수축 이외에도 자기수축이 포함되어 있다. 양생 조건 III에서는 처음부터 기건 양생을 실시하여 자기수축과 건조수축을 함께 측정하였으며, 양생 조건 IV에서는 초기에 수분의 증발을 제한하기 위하여 7일간 밀봉 양생 후 기건 양생을 실시하였다. 마지막으로 양생 조건 V는 표준 양생으로 압축 강도를 측정하기 위하여 몰드 제거 후 수중 양생을 실시한 경우이다.

Table 1 Mixture proportions of tested concrete

Mixture no.	1	2	3
Type I cement, kg/m ³	336	454	525
Water, kg/m ³	168	168	168
W/C	0.50	0.37	0.32
Fine aggregate, kg/m ³	771	729	672
Coarse aggregate, kg/m ³	1038	981	981
HRWRA, C × % by weight	0.5	0.8	1.0
AEA, C × % by weight	0.015	0.017	0.018

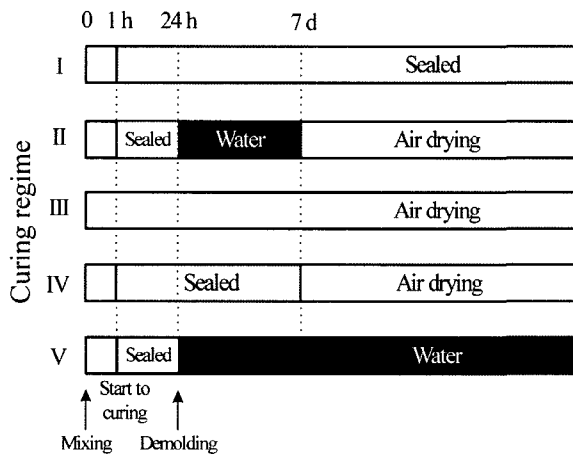


Fig. 1 Schematic representation of five curing regimes employed in this study

Table 2 Four curing regimes employed in this work and the corresponding shrinkage component

Curing regime	Conditions	Swelling	Autogenous shrinkage	Drying shrinkage
I	Immediately after demoulding, the specimens were wrapped by adhesive aluminum tape to avoid any evaporation and then stored at a constant temperature of 20±1°C		○	
II	The specimens were cured under water bath at 20±1°C for 6 days and replaced in temperature-humidity controlled room with 20±1°C and 60±3% RH	○	○	○
III	The specimens were exposed to drying condition at 20±1°C and 60±3%RH over entire testing period		○	○
IV	After sealed curing for 6 days, the specimens were stored in temperature-humidity controlled room with 20±1°C and 60±3% RH		○	○
V	The concrete cylinders were placed in water bath at 20±1°C until testing date	Only for compression test		

2.3 시편 제작 및 길이 변화 측정

콘크리트의 길이 변화를 측정하기 위해 100×100×400mm의 각주형 시편을 이용하여 일본 콘크리트 공학협회(JCI) 자기수축 위원회에서 제안한 방법과 매입 게이지를 함께 이용하였다. 콘크리트 타설 후 처음 24시간 동안은 LVDT와 매입 게이지를, 몰드 제거 이후부터는 매입 게지만을 이용하여 콘크리트의 길이 변화를 측정하였다. 또한, 온도 게이지를 이용하여 콘크리트 시편의 온도 변화를 모니터링하여 열팽창 계수를 $1.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 으로 가정하고 온도 변화에 의한 콘크리트의 변형률을 보정하였다²⁾. 이 밖의 세부적인 사항은 기존 연구³⁾에서와 동일하다.

Fig. 1에 나타낸 5가지 양생 조건이 콘크리트의 압축 강도에 미치는 영향을 조사하기 위해 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 의 공시체를 제작하여 수축 시편과 동일한 조건에서 각각 양생한 후 재령 28일 압축강도를 측정하였다.

2.4 수축 데이터 분석 방법

기 수행된 초음파 속도와 콘크리트 응결과의 상관관계 연구⁴⁾에서 초음파 속도가 일정한 속도에 도달한 시점 이후부터의 수축량이 실제 응력 발생에 기여하는 수축으로 간주하고 이를 유효 수축으로 고려한 바 있다. 또한, 잠재적인 최대 변형률을 얻기 위해서는 콘크리트 배합 후 가능한 한 빠른 시간 내에 측정을 시작해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 콘크리트 배합 후 1시간부터 콘크리트의 길이 변화 측정을 시작하였다. 그러나, 이 때의 콘크리트는 아직 굳지 않은 상태이고 이 때부터 측정된 변형률이 모두 응력 발현에 기여한다고 보기 어려우므로, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 콘크리트 배합 후 처음 24시간 동안 초음파 속도 변화를 모니터링 한 후 초음파 속도가 1,500m/s에 도달하는 시간을 유효 수축의 발현 시점으로 간주하였다⁵⁾. Fig. 2에서 보듯이, 타설 직후 콘크리트의 초음파 속도는 W/C에 상관없이 약 400m/sec 정도 내외이며, 배합 특성에 따라 수 시간 동안 지속되다가 응결이 시작되면서 초음파 속도가 증가하기 시작하여 24시간 후에는 4,000m/sec 이상으로 커지는 것을 알 수 있다.

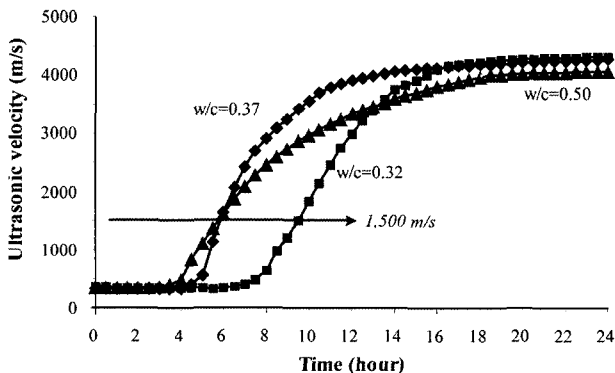


Fig. 2 Development of ultrasonic pulse velocity of concrete made with various W/C's during the first 24 hours

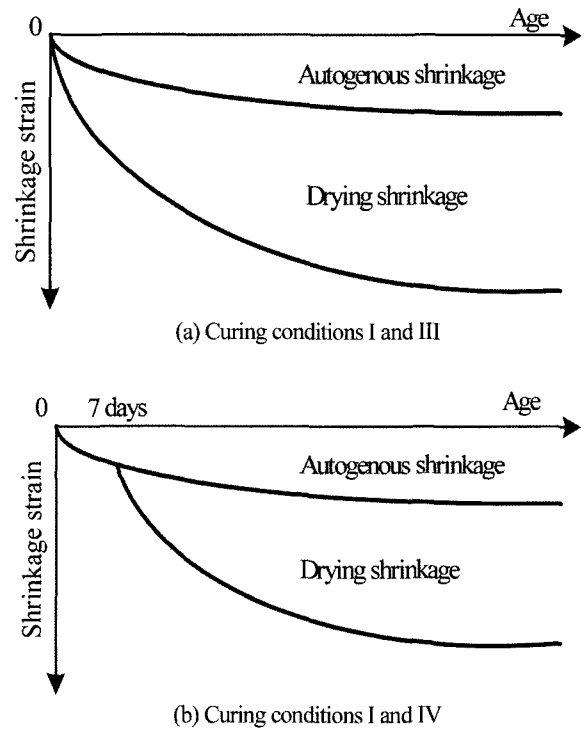


Fig. 3 Schematic representation of shrinkage components of the concrete cured in regime I, III, and IV

콘크리트의 전체 수축은 온도수축, 자기수축, 그리고 건조수축의 합으로 표현할 수 있다. 그러나, 2.3절에서 언급한 바와 같이, 측정된 콘크리트 변형률에 대해 온도 변화에 의한 콘크리트의 변형률을 보정하였으므로, 본 연구에서의 전체 수축은 자기수축과 건조수축만의 합을 의미한다.

Fig. 3은 양생 조건 I, III, IV로부터 콘크리트의 전체 수축에서 자기수축과 건조수축이 차지하는 비율을 도식적으로 나타낸 것으로, 양생 조건 I과 III (Fig. 3(a)) 또는 양생 조건 I과 IV (Fig. 3(b))로부터 각각의 비율을 구할 수 있다. 이와 같은 방법을 이용하여 W/C에 따른 각 수축의 비율을 정량적으로 비교하였다. 본 논문에서 나타낸 콘크리트의 체적 변화 측정 결과 그림에서 (+)는 팽창을, (-)는 수축을 의미한다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 양생 조건별 재령 28일 압축 강도

본 연구에서 사용한 W/C가 0.32, 0.37, 0.50인 OPC 콘크리트의 슬럼프는 각각 180, 190, 180mm, 공기량은 각각 3.5, 4.0, 4.3%로 모두 목표치를 만족하였다. Fig. 4는 양생 조건별 재령 28일 압축 강도를 비교한 것으로, 상대적으로 W/C가 큰 콘크리트(W/C = 0.50)의 경우에는 표준 양생 조건하에서 압축 강도가 31MPa로 가장 크게 나타났으며, 기건 양생이 포함된 양생 조건 II, III, IV하의 콘크리트 강도가 모두 표준 양생 조건의 콘크리트 강도보다 낮은 경향을 나타내었다. 반면에, W/C가 0.37, 0.32로 상대적으로 낮고 수중 양생(양생 조건 V)된 콘크

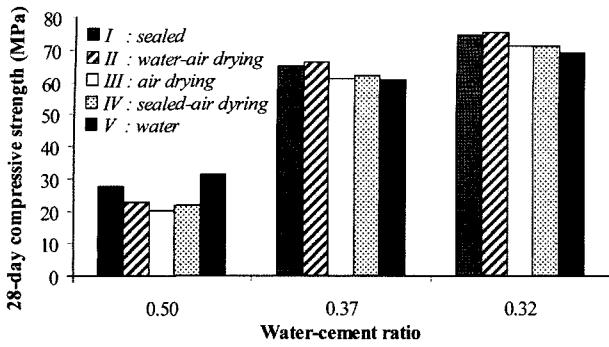


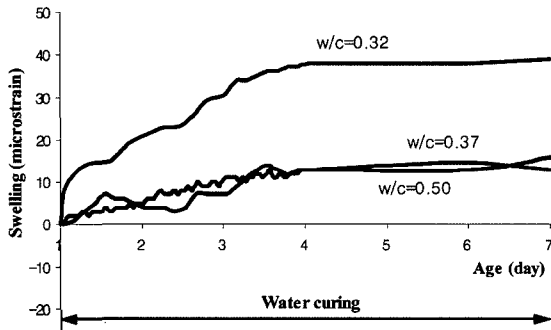
Fig. 4 Comparison of 28-day compressive strength of concrete cured in different condition

리트의 압축 강도는 각각 61, 70MPa로 다른 양생 조건 하의 콘크리트 강도에 비해 다소 낮은 경향을 나타내었다. 재령 28일 강도만을 고려할 때, 6일간 수중 양생 후 실험 전까지 기건 상태인 양생 조건 II에서 가장 높은 28 일 강도를 나타내었는데, 이는 콘크리트 중심과 표면에서의 수분함유량 차이로 표면에서는 건조수축으로 인한 인장응력이, 중심에는 압축응력이 발생하여 일축압축강도가 증가한 것으로 사료된다⁶⁾.

3.2 양생 조건에 따른 콘크리트 체적 변화

3.2.1 양생 조건 I (밀봉 양생)

양생 조건 I은 수분의 증발 또는 흡수를 차단한 것으로



(a) Volumetric variation of 6-day water cured samples

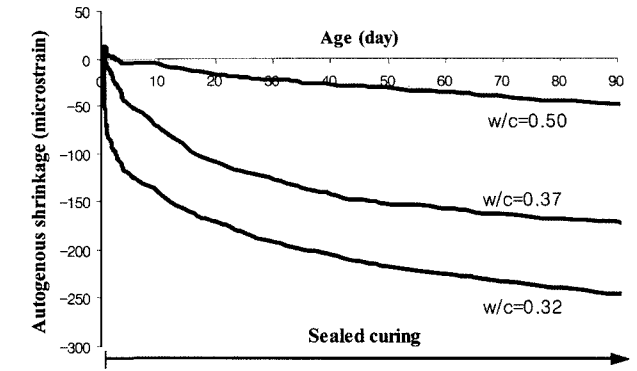
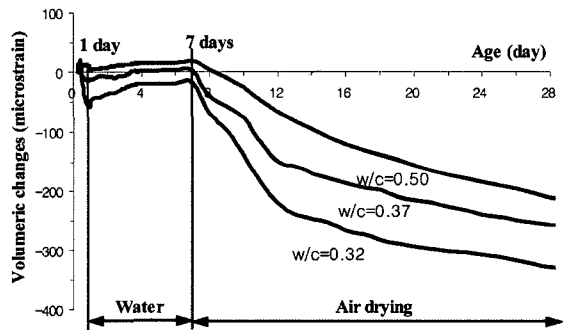


Fig. 5 Autogenous shrinkage strain developed in curing condition I

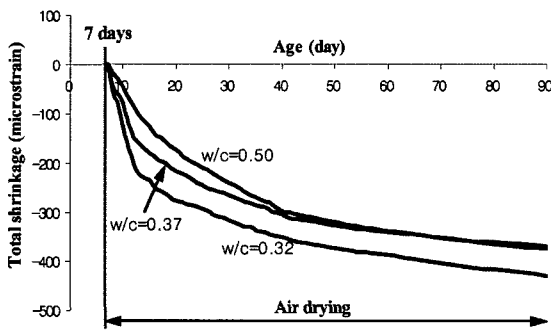
로 이러한 조건에서 측정된 콘크리트의 수축은 자기수축만을 나타낸다. 재령 90일까지의 자기수축 측정 결과를 나타내는 Fig. 5를 보면, W/C가 낮을수록 콘크리트 내부의 건조화가 빠르게 진행되어 재령 초기에 자기수축이 빠르게 발생하였으며, 자기수축량도 크게 나타나 재령 90일에서 각각 245×10^{-6} , 170×10^{-6} , 50×10^{-6} 정도의 자기수축량을 보였다.

3.2.2 양생 조건 II (수중 양생-기건 양생)

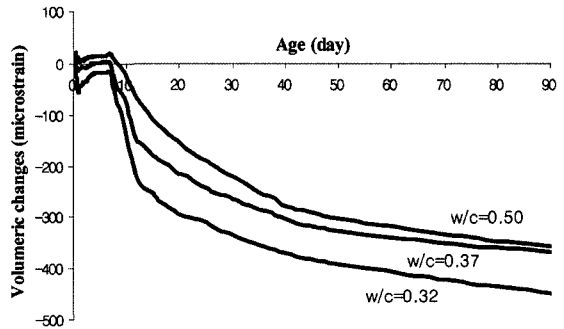
양생 조건 II는 초기 수중 양생이 콘크리트의 전체 수축에 미치는 영향을 조사하기 위한 것으로, Fig. 6은 양생 순서에 따른 콘크리트의 체적 변화를 나타낸다. 재령



(b) Volumetric variations for 28 days for samples under curing condition II



(c) Total shrinkage strain (autogenous+drying) developed between 7 days and 90 days



(d) Volumetric variation of samples in curing condition II

Fig. 6 Volumetric changes of concrete cured in condition II

1일에서 몰드 제거 후 6일간 수중 양생한 시편의 경우 (Fig. 6(a))에는, 수중 양생 개시 시점인 재령 1일에서의 변형률을 0으로 할 때 처음 3일간은 콘크리트가 계속해서 팽창하다가 이후부터는 팽창 속도가 둔화되는 경향을 나타내었다. W/C에 따른 콘크리트의 최대 팽창량을 비교해 보면, W/C가 0.32인 콘크리트가 약 40×10^{-6} 정도로 다른 두 콘크리트에 비해 약 2.6배 정도 크게 나타났으며, W/C가 0.37과 0.50인 콘크리트는 서로 비슷한 팽창량을 보였다. 이러한 수중 양생 하의 콘크리트 부피 팽창은 에트린자이트 및 수산화칼슘의 성장 또는 물 흡착에 의한 C-S-H겔의 팽창에 의해 설명할 수 있다⁷⁾.

재령 28일까지의 체적 변화 결과를 나타내는 Fig. 6(b)로부터 양생 조건의 변화로 인한 콘크리트의 체적 변화를 뚜렷하게 볼 수 있다. 수중 양생 기간동안에는 Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이 콘크리트가 약간의 팽창을 보이다가 기건 양생이 시작된 재령 7일 이후부터 수축하기 시작하였다. 또한, 콘크리트 타설 후 몰드 제거 전인 재령 1일까지 약간의 수축이 발생하였는데, 이는 밀봉 양생으로 인해 약간의 자기수축이 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 6(c)는 기건 양생의 개시 시점인 재령 7일에서의 변형률을 0으로 하여 이후부터 발생한 콘크리트의 수축을 나타낸 것으로, 이 기간 동안 발생한 수축에는 건조 수축은 물론 자기수축도 포함되어 있다. W/C가 0.32인 콘크리트가 가장 큰 수축량을 보였으며, 기건 양생 시작 후 약 50일간은 W/C가 0.37인 콘크리트가 W/C가 0.50인 콘크리트에 비해 다소 많은 수축량을 보였으나 재령이 경과함에 따라 서로 비슷한 수축량을 나타내었다.

Fig. 6(d)는 재령 90일 동안의 콘크리트 체적 변화를 모두 나타낸 것으로, W/C가 0.37, 0.50인 두 콘크리트의 재령 90일에서의 체적 변화량에 큰 차이가 없었다.

3.2.3 양생 조건 III (기건 양생)

Fig. 7은 처음부터 기건 양생을 실시한 콘크리트의 체적 변화를 나타낸 것으로, 양생 조건 III은 양생 조건 I과 달리 수분 증발을 허용함으로써 처음부터 자기수축과 건조수축이 함께 발생하며, W/C가 낮은 콘크리트일수록 전체 수축량이 큰 경향을 나타내었다. 재령 90일에서의 전

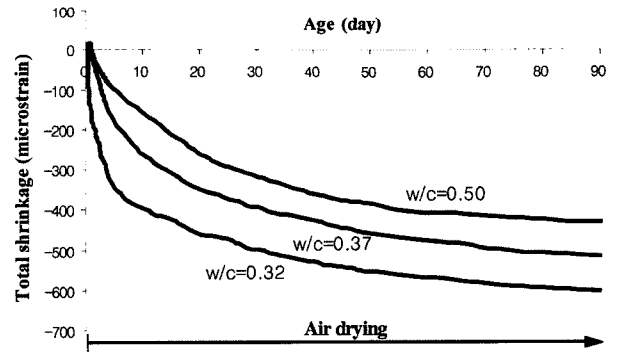


Fig. 7 Total shrinkage strain (autogenous+drying) developed in curing condition III

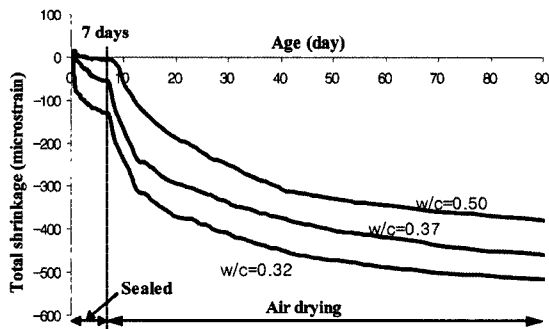
체 수축량을 알아보면, W/C가 낮은 순서대로 각각 605×10^{-6} , 520×10^{-6} , 430×10^{-6} 정도의 전체 수축량을 보였다.

3.2.4 양생 조건 IV (밀봉 양생-기건 양생)

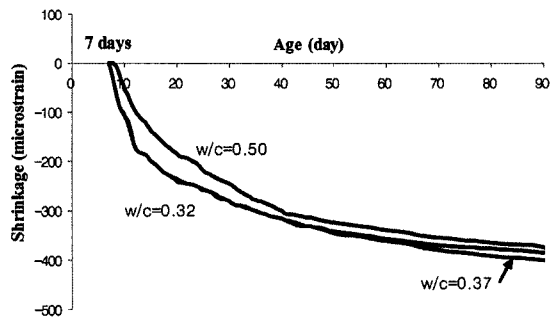
Fig. 8은 몰드 제거 후 처음 6일간 밀봉 양생한 후 기건 양생을 실시한 (양생 조건 IV) 콘크리트 수축 측정 결과를 나타낸다. Fig. 8(a)를 보면, 밀봉 양생 기간 동안에는 자기수축만을 나타내다가 재령 7일 이후 기건 양생이 시작되면서 콘크리트의 전체 수축이 급격히 증가함을 알 수 있으며, 이때의 수축에는 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 자기수축과 건조수축이 포함된 전체 수축을 나타낸다. 양생 조건 III과 비교하여 처음 6일간의 밀봉 양생 기간 동안에는 건조수축이 발생하지 않아 전체 수축량이 다소 감소하였으며, W/C가 낮을수록 전체 수축이 증가하는 경향을 보였다. 그러나, Fig. 8(b)에서 보듯이 재령 7일 이후부터 발생한 전체 수축량만을 고려한 경우에는 W/C에 따라서 전체 수축량에 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 Fig. 5에서 보듯이, W/C가 낮은 콘크리트일수록 밀봉 양생 기간 동안 상대적으로 큰 자기수축이 이미 발생하였기 때문에 기건 양생 기간 동안 발생한 전체 수축량은 서로 비슷한 경향을 나타낸 것으로 사료된다.

3.3 순 건조수축량

Fig. 9는 W/C에 따른 순 건조수축량 변화를 나타낸 것

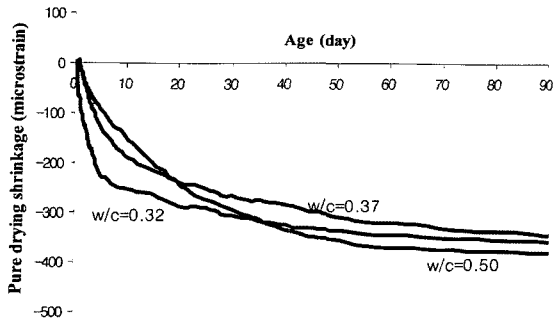


(a) Volumetric variation of samples in curing condition IV

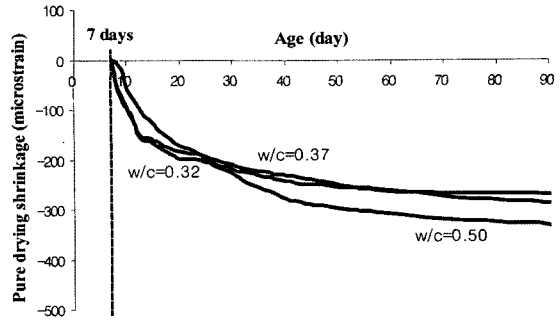


(b) Total shrinkage strain developed between 7 days and 90 days

Fig. 8 Volumetric variation of samples developed in curing condition IV



(a) From curing condition III and I



(b) From curing condition IV and I

Fig. 9 Net drying shrinkage strain derived by subtracting the strains developed in condition I from those in condition III and IV

으로, Fig. 3과 같이 양생 조건 III 또는 IV에서의 전체 수축량에서 양생 조건 I에서의 자기수축량을 제외시킴으로써 구할 수 있다. 재령 초기에는 W/C가 낮을수록 건조수축이 상대적으로 빠르게 발생하였으나 재령이 증가하면서 세 종류 콘크리트의 건조수축 발현속도가 비슷하며 건조수축량에 큰 차이를 보이지 않았다. W/C가 일정한 경우, 시멘트량이 증가함에 따라 수축에 기여하는 시멘트 풀의 부피가 증가하여 건조수축도 증가하는 경향을 나타내지만, 본 연구에서 사용한 콘크리트 배합에서와 같이 단위 수량이 일정하고 시멘트량을 증가시킨 경우에는 W/C 감소로 인해 콘크리트가 수축에 보다 잘 저항할 수 있기 때문에 건조수축이 시멘트량에 큰 영향을 받지 않는 경향을 나타낸다⁸⁾. 또한, W/C가 동일한 경우 양생 조건 I과 III으로부터 구한 순 건조수축량(Fig. 9(a))이 양생 조건 I과 IV로부터 구한 것(Fig. 9(b))보다 다소 큰 경향을 나타내었다.

W/C가 서로 다른 콘크리트의 전체 수축에서 건조수축이 차지하는 비율을 살펴보면, 양생 조건 I과 III으로부터 재령 28일과 90일에서 W/C가 0.50인 경우에는 각각 93%와 89%로 매우 높았으나 W/C가 0.32인 경우에는 각각 62%와 59%로 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 양생 조건 I과 IV로부터 재령 28일과 90일에서 W/C가 0.50인 경우에는 각각 91%와 87%, W/C가 0.32인 경우에는 각각 53%와 52%로 크게 줄어드는 경향을 나타내었다. 참고로, W/C가 0.16으로 매우 낮은 초고강도 콘크리트의 경우엔 전체수축에서 건조수축이 차지하는 비율이 20~30% 정도가 되는 것으로 보고된 바 있다⁹⁾.

이러한 결과로부터 W/C가 높은 저강도 콘크리트에서는 건조수축이 지배적인 수축이지만, W/C가 낮은 고강도 콘크리트에서는 자기수축이 차지하는 비율이 상대적으로 증가하기 때문에 자기수축으로 인한 균열 발생에 대한 적절한 대책이 요구된다.

3.4 양생에 의한 수축 감소율 비교

Table 3은 W/C가 각각 0.32, 0.37, 0.50인 OPC 콘크리트의 재령 28일과 90일에서의 수축량을 나타내며, 괄호 안의 숫자는 가장 큰 전체 수축량을 보인 양생 조건

Table 3 Comparison of shrinkage strain ($\times 10^{-6}$) of tested concretes at 28 and 90 days

W/C	Age	Curing regime			
		I	II	III	IV
0.50	28 days	22 (7.1) [*]	211(68.5)	308 (100)	240(77.9)
	90 days	48(11.1)	357(82.3)	431(100)	378(87.7)
0.37	28 days	124(31.7)	257(67.5)	391(100)	329(86.4)
	90 days	172(33.2)	369(72.6)	518(100)	458(88.4)
0.32	28 days	190(38.4)	329(66.5)	495(100)	405(81.8)
	90 days	246(40.7)	448(74.0)	605(100)	515(85.1)

^{*} Ratio of the strain developed in curing conditions I, II, and IV to that in curing condition III

III에서의 수축량에 대한 양생 조건 I, II, IV에서의 수축량 비율 백분율로 나타낸 것이다.

가장 큰 수축을 나타낸 양생 조건 III과 비교하여 재령 28일과 90일에서 W/C별 양생 조건 II와 IV에서의 수축 감소율을 살펴보면, W/C가 0.32인 경우, 몰드 제거 후 6일 동안 수중 양생을 실시한 양생 조건 II에서는 각각 33.5%, 26.0%, 6일간 수분 증발을 차단한 양생 조건 IV에서는 각각 18.2%, 14.9%의 전체 수축량이 감소하였다.

한편 W/C가 0.32인 경우, 재령 28일과 90일에서 실제 수축감소량은 양생 조건 II에서는 각각 166×10^{-6} , 157×10^{-6} 이고, 양생 조건 IV에서는 90×10^{-6} 으로 동일한 값을 나타내었으며 이는 수중양생 혹은 밀봉양생으로 인하여 감소된 수축량이 그 이후에도 계속 유지되고 있음을 의미한다. W/C가 0.37과 0.50인 경우에도 수축감소량이 W/C가 0.32인 경우에 비하여 작아지기는 하였지만 유사한 경향을 나타내었다.

본 연구에서 사용한 수축 시험편($100 \times 100 \times 400$ mm)과 같이 크기가 작은 콘크리트 부재의 경우에는 습윤 양생에 의한 전체 수축 감소 효과가 전 단면에 걸쳐 골고루 나타날 수 있으나, 단면이 큰 기둥 및 두께가 큰 보나 슬래브 등과 같이 부재의 크기가 크고 수분침투계수가 커서 외부로부터의 수분이 도달하기 어려운 부재 중심부와 거푸집과 맞닿아 있는 측면에서는 서로 다른 수축 양상을 나타낼 수 있다. 즉, 거푸집 상태에 있는 콘크리트 부재 표면에서의 수축은 수분 공급을 통해 최소화 할 수

있으나, 부재 중심부에는 외부로부터의 수분 공급이 거의 이루어 지지 않기 때문에 수분 공급에 의한 자기수축 감소를 기대할 수 없다. 그러나, 중심부에서는 자기수축이 발생하는 동안 콘크리트의 인장 강도 또한 매우 빠른 증가를 나타내고, 건조수축이 발생하지 않기 때문에 일반적으로 수축에 의한 균열 발생 위험은 거의 없다고 볼 수 있다^{1,10)}.

거푸집과 맞닿아 있는 측면에서는 거푸집을 제거하자마자 건조수축이 발생할 수 있기 때문에 보다 세심한 양생 방법이 요구된다. 특히, 보나 슬래브의 저면은 자중에 의한 과도한 처짐을 막기 위해 거푸집이 가능한 한 오래 유지되는 부분이기 때문에 적당한 대책이 취해지지 않는다면 자기수축이 최대에 도달할 수 있다. 한편, 부재의 두께가 상대적으로 작은 보나 슬래브의 경우에는 소성수축 및 건조수축이 가장 문제가 되기 때문에 적절한 습윤 양생을 통해 콘크리트 표면의 건조화를 최소화해야 한다. 따라서, W/C가 낮은 고강도 콘크리트는 타설 이후 가능한 한 빠른 시간 내에 적절한 습윤 양생을 실시하고 시공 상 허용범위 내에서 거푸집을 약간 띄워 콘크리트 부재 측면에 수분을 공급하면서 거푸집 탈형 시기를 늦춘다면 전체 수축량을 감소시킴으로써 균열 발생 가능성을 효과적으로 낮출 수 있을 것으로 판단되며, 구조물의 종류와 크기에 따라 그에 맞는 적절한 양생 방법이 적용되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) W/C에 따라 콘크리트의 전체 수축에서 자기수축과 건조수축이 각각 차지하는 비율이 다르게 나타났다. W/C가 0.50인 콘크리트의 경우에는 재령 90일에서 전체 수축(양생 조건 III 기준)의 약 89% 정도가 건조수축임에 반해, W/C가 0.37, 0.32인 콘크리트의 경우에는 건조수축의 비율이 크게 감소하여 각각 67%, 59% 정도로 나타났다. 다시 말해, W/C가 높은 저강도 콘크리트는 건조수축이 전체 수축을 지배하지만 W/C가 낮은 고강도 콘크리트는 자기수축의 비율이 상대적으로 크게 증가하기 때문에 고강도 콘크리트 사용 시 자기수축에 대한 검토가 반드시 이루어져야 한다.
- 2) W/C가 낮은 고강도 콘크리트의 경우, 수분 증발을 허용한 양생 방법 III에 비해 재령 초기에 6일간 수중 양생을 통하여 외부로부터 계속해서 수분이 공급된 양생 방법 II에서는 재령 90일을 기준으로 약

26~28% 정도의 전체 수축이 감소하였고, 콘크리트를 일정 기간 밀봉하여 수분의 증발을 억제한 양생 방법 IV에서는 약 12~15% 정도의 콘크리트의 전체 수축이 감소하였으며, 수축 저감에는 양생 방법 II가 가장 유리하게 나타났다. 따라서, 고강도 또는 고성능 콘크리트의 전체 수축을 줄여 균열 발생 가능성을 낮추기 위해서는 콘크리트 타설 후 가능한 한 이른 시간 내에 습윤 양생을 실시하거나 최소한 수분 증발로부터 콘크리트를 보호해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부의 지원사업인 교량설계 핵심기술연구단의 콘크리트 교량의 내구성 설계기술 개발과제 및 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의해 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Aitcin, P. -C., *High-Performance Concrete*, E&FN Spon, London and New York, 1998, 322pp.
2. Aitcin, P. -C., "Autogenous Shrinkage Measurement", *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage*, Edited by E. Tazawa, June 13-14, Hiroshima, Japan, 1998, pp.257~268.
3. Lee, H. K., Lee, K. M., and Kim, B. G., "Autogenous Shrinkage of High-performance Concrete Containing Fly Ash", *Magazined of Concrete Research*, Vol.55, No.6, 2003, pp.507~515.
4. Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, Y. H., Yim, H., and Bae, D. B., "Ultrasonic In Situ Monitoring of Setting Process of High-Performance Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.34, No.4, 2004, pp.631~640.
5. 이광명, 이회근, 권기현, 이승훈, 김규용, "고로 슬래그를 함유한 콘크리트의 자기수축 특성", 콘크리트학회 논문집, 제16권 1호, 2004, pp.621~626.
6. Popovics, S., *Strength and Related Properties of Concrete*, John Wiley & Sons, Inc., 1998, pp.241~245.
7. Aitcin, P. -C., "Dose Concrete Shrink or Does it Swell?", *Concrete International*, V.21, No.11, 1999, pp.54~56.
8. Neville, A.M., *Properties of Concrete*, 4th edition, Longman, England, 1995, pp.429~435.
9. 김지원, 손유신, 이주하, 김규동, 이승훈, 윤영수, "설계 강도 120 MPa 초고강도 콘크리트의 초기재령 자기수축 특성 연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제16권 2호, 2004, pp.293~296.
10. Mladenka S. C. and Aitcin, P. -C., "Influence of Curing Conditions on Shrinkage of Blended Cements Containing Various Amounts of Slag", *ACI Materials Journal*, Vol.100, No.6, 2003, pp.477~484.

요 약 본 연구에서는 서로 다른 양생 조건하에서 W/C가 0.32~0.50인 콘크리트의 체적 변화를 실험을 통해 조사하였다. 콘크리트의 팽창뿐만 아니라 자기수축 및 건조수축을 측정하기 위해 4개의 서로 다른 양생 방법이 적용되었다. 밀봉을 통하여 수분 증발을 억제한 양생(조건 I)에서의 콘크리트는 자기수축만을 나타내었으며, W/C가 낮을수록 자기수축이 증가하였다. 처음 6일간 수중 양생한 후 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$, $60\pm 3\%$ RH의 조건에 노출시킨 기건 양생(조건 II)에서는 콘크리트가 팽창하였다가 수축하였다. 최대 팽창량은 $15\sim 40\times 10^{-6}$ 정도였으며, W/C가 0.32인 콘크리트에서 가장 큰 전체 수축(자기수축+건조수축)량을 보였다. 처음부터 기건 양생(조건 III)한 콘크리트의 전체 수축은 양생 조건 II에서보다 증가하였다. 6일간의 밀봉 양생 후 기건 양생(조건 IV)한 경우에는 전체 수축이 양생 조건 III에 비해 다소 줄어들었다. 양생 조건 I, III, IV에서의 수축 결과로부터 순수한 건조수축량을 구할 수 있으며, 전체 수축량은 비슷함에도 불구하고 W/C가 증가함에 따라 건조수축이 증가하였다. 이는 W/C가 큰 콘크리트에서는 건조수축이 전체 수축을 지배함을 의미한다. 다시 말해, W/C가 낮은 콘크리트인 경우 전체 수축에서 자기수축이 차지하는 비율이 증가하기 때문에 잠재적인 균열 발생 측면에서 자기수축에 대한 검토가 반드시 요구된다. 결론적으로, 고강도 또는 고성능 콘크리트의 전체 수축은 적절한 초기 수중 양생을 통하여 효과적으로 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 자기수축, 건조수축, 팽창, 물-시멘트 비, 양생